

# ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ДУАЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ

*Абашкин А.Д., Осипов С.П., Осипов О.С.*

*Томский политехнический университет, г. Томск*

*Научный руководитель: Осипов С.П., к.т.н., ведущий научный сотрудник Российско-китайской научной лаборатории радиационного контроля и досмотра*

## 1 Введение

Задача определения плотности различных материалов характерна для многих отраслей науки, промышленности, строительной индустрии, таможенного контроля. Для оценки плотности широко используются радиационные методы, основанные на измерении ослабления или рассеяния гамма - или рентгеновского излучения [1–3]. Применение источников гамма-излучения ограничивается малой удельной активностью, диапазоном энергий излучения, значительным размером излучателя. Источники рентгеновского излучения свободны от этих недостатков. В настоящее время является актуальной проблема, связанная с разработкой высокоточных измерителей плотности крупногабаритных объектов контроля (ОК) с переменной толщиной. Дополнительно от измерителей плотности требуют универсальности, заключающейся в независимости качества измерений от эффективного атомного номера материала ОК. В работе [4] приведена математическая модель многоканального высокоэнергетического абсорбционного рентгеновского измерителя плотности однородных объектов с переменной толщиной. Модель учитывает особенности взаимодействия высокоэнергетического излучения с веществом, преобразования аналоговых сигналов в цифровые сигналы, и включает в себя уравнение плотномера и необходимые ограничения и рекомендации. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований на комплексе высокоэнергетической цифровой радиографии НИ ТПУ с источником излучения бетатроном МИБ-4,5/9 показало значимое смещение оценок плотности [4], обусловленное излучением, рассеянным в ОК. Изменение химического состава материала ОК приводит к смещению оценки плотности [5]. Указанное смещение вызывается ужесточением пучка рентгеновского излучения за ОК, причем это ужесточение тем значительнее, чем больше толщина ОК и чем больше плотность и эффективный атомный номер материала ОК.

Для компенсации этого эффекта в рентгеновской вычислительной томографии используется метод дуальный энергий (МДЭ) [6]. В последнее время МДЭ нашел применение в таможенном контроле, этот метод позволяет идентифицировать материалы ОК. Высокоэнергетическая реализация способа идентификации материалов посредством МДЭ подробно изложена в работе [7]. В МДЭ в результате обработки сигналов, полученных для двух, специальным образом выбранных, максимальных энергий рентгеновского излучения оценивается распределение двух параметров, один зависит от массовой толщины, а второй еще и от эффективного атомного номера ОК. На этом и основана возможность измерения плотности с минимальным влиянием эффективного атомного номера материала ОК. В литературе недостаточно обсуждены вопросы измерения плотности материалов на основе высокоэнергетического МДЭ.

## 2 Основы теории

Зависимость линейного коэффициента ослабления  $\mu$  от энергии  $E$  материалом объекта контроля плотностью  $\rho$ , эффективным атомным номером  $Z$  и толщиной  $H$  в области энергий рентгеновского излучения, превышающих 1,022 МэВ, определяется эффектом Комптона и эффектом рождения пар и описывается выражением [6, 7]

$$\mu(E) = A(\rho H, Z)g_1(E) + B(\rho H, Z)g_2(E), \quad (1)$$

здесь  $g_1(E)$ ,  $g_2(E)$  – энергетические зависимости сечений эффекта Комптона и эффекта рождения пар. Формулы связи параметров МДЭ  $A$  и  $B$  с параметрами объекта контроля имеют вид

$$A(\rho H, Z) = \rho H, \quad B(\rho H, Z) = \rho HZ = A(\rho H, Z)Z. \quad (2)$$

Из анализа (2) следует, что для рассматриваемой задачи информативным является параметр  $A$ . При известном значении толщины ОК первое уравнение из (2) является уравнением измерителя плотности.

Пусть ОК облучается двумя пучками рентгеновского излучения с максимальными энергиями  $E_1$  и  $E_2$  с энергетическими спектрами  $f(E, E_1)$  и  $f(E, E_2)$ . Параметры МДЭ  $A$  и  $B$  находятся из значений экспериментальных сигналов  $y_1$  и  $y_2$  – радиационных толщин объекта для максимальных энергий рентгеновского излучения  $E_1$  и  $E_2$ . Соответствующая система выглядит следующим образом [7, 8]

$$\begin{aligned}
& - \ln \frac{\int_0^{E_1} E_{ab}(E) f(E, E_1) e^{-Ag_1(E) - Bg_2(E)} \varepsilon(E, h) dE}{\int_0^{E_1} E_{ab}(E) f(E, E_1) \varepsilon(E, h) dE} = y_1 \\
& - \ln \frac{\int_0^{E_2} E_{ab}(E) f(E, E_2) e^{-Ag_1(E) - Bg_2(E)} \varepsilon(E, h) dE}{\int_0^{E_2} E_{ab}(E) f(E, E_2) \varepsilon(E, h) dE} = y_2,
\end{aligned} \tag{3}$$

здесь  $E_{ab}(E)$  – среднее значение поглощенной энергии зарегистрированного фотона [9];  $\varepsilon(E, h)$  – эффективность регистрации фотонов с энергией  $E$  сцинтилляционным детектором толщиной  $h$ .

Существует несколько подходов к решению системы (3) [7, 8, 10]. Первый подход основан на полной информации всех энергетических зависимостей системе (3). Во втором подходе строится регрессионная зависимость параметров  $A$  и  $B$  от сигналов  $y_1$  и  $y_2$ . Используется полиномиальная зависимость второго порядка. По калибровочным данным определяются 6 параметров полинома. В работе [10] предлагается несколько модификаций физически обоснованного экспресс-метода измерения параметров метода дуальных энергий. Метод отличается высокой точностью и предназначен для использования в системах двухэнергетической цифровой радиографии и двухэнергетической рентгеновской вычислительной томографии. Упомянутый метод может быть использован и в трансмиссионных рентгеновских измерителях плотности. В этом случае предназначением метода является устранение влияния химического состава материала объекта на точность оценки плотности.

### 3 Экспериментальные исследования

На комплексе высокоэнергетической цифровой радиографии Томского политехнического университета была проведена серия экспериментов по оценке метрологических характеристик применительно к измерителю плотности материалов объектов контроля от 20 до 120 г/см<sup>3</sup>. Источник рентгеновского излучения – бетатрон МИБ-9 с возможностью формирования импульсов рентгеновского излучения различной максимальной энергии. Исходные сигналы формировали для двух пар максимальных энергий излучения: 4 МэВ – 7,5 МэВ; 4,5 МэВ – 9 МэВ. В качестве калибровочных объектов

просвечивали бутылки с водой, изделия из плексигласа, полиамида, дерева, алюминия, стали и свинца.

Результаты экспериментов обрабатывали по методу из работы [10]. Погрешность оценки плотности для изделий из органических материалов составила около  $0,005 \text{ г/см}^3$ , из алюминиевых сплавов –  $0,05 \text{ г/см}^3$ , из стальных сплавов –  $0,08 \text{ г/см}^3$ , из сплавов свинца –  $0,15 \text{ г/см}^3$ . Для неоднородных по структуре материалов – муки, поваренной соли, древесины, цемента погрешность оценки оказалась выше.

#### **4 Заключение**

В результате анализа проведенных исследований можно считать доказанной принципиальную возможность измерения плотности различных материалов высокоэнергетическим методом дуальных энергий в диапазоне массовых толщин объектов контроля от  $20 \text{ г/см}^3$  до  $120 \text{ г/см}^3$  с абсолютной погрешностью от  $0,005 \text{ г/см}^3$  для органических материалов и до  $0,15 \text{ г/см}^3$  для свинцовых сплавов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере научной деятельности.

#### **Список информационных источников**

1. Воробьев, В.А., Горшков, В.А., Шеломанов, А.Е. Гамма-плотнометрия. – М.: Энергоатомиздат. – 1989. – 144 с.
2. Козак, Т.Н. Радиационные плотнометры, регистрирующие обратно рассеянное гамма-излучение // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2011. – Випуск 5. – С. 11–15.
3. Недавний, О.И., Недавний, И.О., Осипов, С.П. Выбор расстояния от источника излучения до объекта контроля для гамма-абсорбционного плотнометра в геометрии расходящегося пучка // Дефектоскопия. – 2000. – № 7. – С. 76–81.
4. Горшков, В.А. Особенности рентгеновской плотнометрии в условиях вариации химического состава объекта // Контроль. Диагностика. – 2014. – № 10. – С. 25–30.
5. Osipov, S., Chakhlov, S., Osipov, O., Badin, S., Abashkin, A. Features of X-ray absorption densitometry of large-size objects with variable thickness // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 671. – No. paper 012043. – 6 p.
6. Завьялкин, Ф.М., Осипов, С.П. Выбор размеров сцинтилляционных детекторов и энергии коррекции при использовании

метода дуальной энергии в вычислительной томографии // Дефектоскопия. – 1985. – № 9. – С. 71–76.

7. Чахлов, С.В., Осипов, С.П. Высокоэнергетический метод дуальных энергий для идентификации веществ объектов контроля // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 9. – С. 9–17.

8. Osipov, S.P., Chakhlov, S.V., Osipov, O.S., Shtein, A.M., Strugovtsev, D.V. About accuracy of the discrimination parameter estimation for the dual high-energy method // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering / RTER2014. Tomsk –2015. – Vol. 81. – No. paper 012082. – 13 p.

9. Завьялкин, Ф.М., Осипов, С.П. Зависимость среднего значения и флуктуаций поглощенной энергии от размеров сцинтиллятора // Атомная энергия. – 1985. – Т. 59. – вып. 4 – С. 281–283.

10. Osipov, S.P., Libin, E.E., Chakhlov, S.V., Osipov, O.S., Shtein, A.M. Parameter identification method for dual-energy X-ray imaging // NDT & E International. – 2015. – Vol. 76. – P. 38–42.

## **ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЦИФРОВОЙ РАДИОГРАФИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ТИПА УУКМ**

*Абрамов М.С.*

*Томский политехнический университет, г. Томск.*

*Научный руководитель: Капранов Б.И., д.т.н., ведущий эксперт  
кафедры физических методов и приборов контроля качества*

В промышленности широкое распространение получили методы контроля качества материалов и изделий без их разрушения, которые обеспечивают выявление скрытых дефектов, во многих случаях поддаются автоматизации и позволяют существенно повысить качество готовой продукции и увеличить производительность контрольных операций. Эти методы обладают высокой чувствительностью, обеспечивают безопасность и безаварийность работы агрегатов и конструкций. Применение методов НК способствуют повышению надежности и долговечности изделий.

Цифровая радиография – совокупность методов неразрушающего контроля, при которых изображение, получаемое с помощью ионизирующего излучения, преобразовывается в цифровой сигнал. Этот сигнал сохраняется в памяти компьютера и обрабатывается. Полученное изображение воспроизводится на экран монитора и